جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و دوم، زمستان ۱۳۹۸

صص ۱۰۱- ۸۷

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.74556

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی و پهنه‌بندی گسترش آتش‌سوزی در اکوسیستم جنگلی به کمک مدل FARSITE (مطالعه موردی: جنگل‌های استان ایلام)

مطهره محمدپور- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سولماز دشتی[1]- دانشیار گروه محیط‌زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۱۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۸/۲

چکیده

امروزه پدیده آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی بخش وسیعی از جنگل‌های جهان را مورد تهدید قرار داده است. با توجه به اثرات مخرب آتش‌سوزی بر جنگل، انجام تحقیقاتی که با استفاده از روش‌های کارآمد بتوانند گسترش آتش‌سوزی را پیش‌بینی کنند، بسیار ارزشمند است. بر همین مبنا شبیه‌سازی آتش با استفاده از مدل FARSITE در جنگل‌های استان ایلام در سال ۱۳۹۵ به انجام رسید. FARSITE مدل بررسی رفتار و گسترش آتش به‌شمار می‌رود که از عوامل متعددی ازجمله شیب، جهت، ارتفاع، ماده سوختی و اطلاعات هواشناسی بهره می‌برد. در این پژوهش نیز از عوامل ذکر شده استفاده گردید. مدل ماده سوختنی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی در شبیه‌سازی با توجه به شرایط پوشش گیاهی منطقه تعیین گردید. تغییرات محلی سرعت و جهت باد که در نتیجه شرایط توپوگرافی منطقه حادث می‌شود، شبیه‌سازی و در FARSITE مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در چهار منطقه که آتش‌سوزی رخ داده آتش رفتار مختلفی داشته است که آن هم به علت شرایط طبیعی متفاوت در این مناطق می‌باشد. پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی در استان ایلام نشان می‌دهد که ۱/۵ درصد از منطقه دارای ریسک بسیار زیاد می‌باشند، پس استفاده اجرایی از این مدل راهنمای مفیدی برای مدیریت آتش‌سوزی جنگل می‌باشد و براساس آن می‌توان برنامه مدیریت بحران آتش‌سوزی در سه فاز عملیات مقدماتی یا اقدامات قبل وقوع (طرح پیش‌گیری)، اقدامات حین وقوع (طرح مقابله) و عملیات پس از وقوع (طرح بازیابی) تدوین شود.

کلیدواژه: آتش‌سوزی، جنگل، FARSITE، توپوگرافی، اقلیم، ماده سوختنی، ایلام

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۶۳۱۶۲۱۷۶ Email: soolmazdashti@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

آتش‌سوزی جنگل‌ها و مراتع نه‌تنها از دیدگاه زیست‌محیطی بلکه از نظر اقتصادی، اجتماعی و امنیتی نیز یکی اصلی‌ترین نگرانی‌ها در بسیاری از کشورهای جهان (Jahdi et al., 2015) و نیز به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین عوامل ایجاد تغییرات نامطلوب اکوسیستم‌های جنگلی در کوتاه‌مدت به‌شمار می‌رود (Coban & Mehmet, 2010). این آتش‌سوزی‌ها می‌توانند به‌طور طبیعی و بر اثر تغییر آب و هوا (Liu et al., 2013) و یا به‌طور غیرطبیعی حاصل از فعالیت‌های انسانی در جنگل‌ها رخ دهند (Nuryanto, 2015) که سبب کاهش منابع تولید اکسیژن بر روی زمین و تصاعد گازهای گلخانه‌ای در اثر آتش‌سوزی و پیرو آن افزایش میزان آتش‌سوزی‌های جنگل در سراسر جهان به صورت هشدار دهنده‌ای می‌شوند، که این وقایع حوادث ناگوار زیست‌محیطی دیگری را نیز در پی دارند (Denham et al., 2012). در نتیجه بسیاری از جوامع علمی و مدیریت منابع طبیعی به آتش‌سوزی‌های رخ داده در جنگل توجه می‌کنند و بیان دارند که پیش‌بینی صحیح گسترش آتش‌سوزی جنگل موضوعی حیاتی در حداقل نمودن اثرات مخرب ناشی از آن است (Artes et al., 2013). گسترش آتش یک فرآیند پویایی فضایی و زمانی است که به عوامل متعددی نظیر آب و هوا، توپوگرافی، نوع سوخت و رطوبت سوخت (FMC) بستگی دارد (Salis et al., 2015). پس تجزیه و تحلیل و تعیین احتمال آتش‌سوزی بالقوه، اندازه، شدت آتش‌سوزی و شرایط محیطی برای مدیریت مؤثر آتش‌سوزی و واکنش اضطراری پیشگیرانه ضروری می‌باشد (Ager et al., 2014). برای فهم این موضوع و پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها مدیریت آتش نیاز به درک عوامل فضایی، توزیع سوخت و پارامترهای محیطی برای ارزیابی ریسک، برنامه‌ریزی درمان و نظارت بر اثر بخشی از این درمان‌ها دارد (Artes et al., 2013). مدل‌های پیش‌بینی گسترش آتش برای شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی شیمیایی و پویا در فضاهای بزرگ و ناهمگون و تحت شرایط تغییر رطوبت هوا ایجاد شده‌اند (Salis et al., 2015)، اما پیش‌بینی گسترش آتش‌سوزی در جنگل عمدتاً به دو دلیل بسیار مشکل است:

الف) بسیاری از این داده‌ها در معرض سطوح مهم عدم قطعیت قرار می‌گیرند؛

ب) هر پیش‌بینی باید تحت محدودیت‌های زمان واقعی محدود شود، در غیر این صورت، بلا استفاده است (Brun et al., 2017). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی مدل‌های گسترش آتش‌سوزی انجام شده است که مدل FARSITE به علت ساختار پایدار و سادگی محبوبیت و کاربرد فراوان در مدل‌سازی گسترش آتش داشته است (اسکندری، ۱۳۹٤). این مدل به‌عنوان یکی از سیستم‌های اصلی شبیه‌سازی آتش به‌شمار می‌رود که به منظور تشریح و بررسی رفتار و انتشار آتش‌سوزی‌های مهیب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Finney, 2004)، که یک مدل نیمه‌تجربی پیش‌بینی آتش است که روترمل (Shen et al., 2017) آن را توسعه داده و در آن سیستم

مدل‌سازی ماده سوختنی و پیش‌بینی رفتار آتش ترکیب شده است. ازآنجاکه این سیستم یک مدل مشخص زمانی و مکانی است می‌تواند تجزیه و تحلیل دقیق از رفتار آتش، مانند جهت و مساحت گسترش آتش و آثار آن را تولید کند. گسترش فضایی آتش در این مدل به صورت پخش موج بیضی شکل با به‌کارگیری اصل Huygens شبیه‌سازی می‌شود (Jahdi et al., 2015). با توجه به ویژگی‌های مثبت این روش Kanga و Singh (۲۰۱۷) گسترش آتش‌سوزی را با استفاده از شبیه‌ساز FARSITE و GIS مدل‌سازی کردند. نتایج، کارایی بالایی ترکیب FARSITE و GIS در مدیریت کنترل آتش‌سوزی نشان داد. Jahdi و همکاران (۲۰۱۵) مدل گسترش آتش‌سوزی FARSITE را با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در جنگل شمال ایران کالیبره کردند. در این شبیه‌سازی خروجی‌های دقیقی را ارائه دادند که به‌طور دقیقی بازتاب رفتار و محیط آتش‌سوزی‌های واقعی مشاهده شده بود.

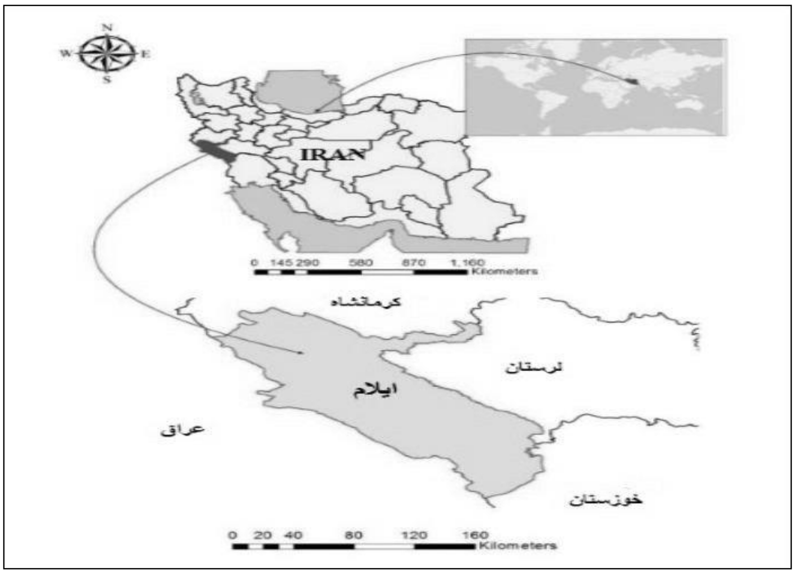
Rwanga و Ndambuki (۲۰۱٤) گسترش آتش‌سوزی جنگل‌های شمال آمریکا را با استفاده از شبیه‌ساز FARSITE و GIS مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که ترکیب FARSITE و GIS برای شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل می‌تواند استراتژی مدیریتی قابل قبولی را برای کاهش خسارات ناشی از آتش‌سوزی بر محیط‌زیست، زندگی و دارایی‌ها و املاک ارائه دهد. Wu و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه تداخل کاهش سوخت برای کاهش میزان و شدت آتش‌سوزی در یک چشم‌انداز جنگلی بکر در شمال‌شرقی چین با استفاده از مدل شبیه‌ساز FARSITE مورد بررسی قرار دادند نتایج نشان داد که مدل مادهٔ سوختنی به‌طور مؤثر در محاسبهٔ رفتار آتش در مدیریت جنگل می‌تواند مفید باشد. در ایران نیز متکان و همکاران (۱۳۹۲) شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی عرصه‌های طبیعی جنگل‌های شهرستان نکا را با استفاده از مدل FARSITE مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهندهٔ کارآیی مدل FARSITE در عرصه‌های طبیعی بود. در سال ۱۳۹٤ جهدی و همکاران نقشه تیپ ماده سوختنی و پیش‌بینی رفتار آتش سطحی را در جنگل‌های مجاور روستای توشی، واقع در کلدمسرا در شهرستان سیاهکل با استفاده از مدل FARSITE مورد بررسی قرار دادند. قادمی‌راد و کریمی (۱۳۹٤) ارزیابی عملکرد رویکردی مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل‌های بخش لاکان شهرستان رشت را با مدل اتوماتای سلولی به انجام رساندند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که روش برجاک با طول ضلع پیکسل سه تا هفت متر برای مدل‌سازی گسترش آتش در مناطق جنگلی استان گیلان مناسب است.

جنگل‌های غرب ایران به خصوص در مواقع خشک‌سالی شاهد افزایش چشم‌گیری در رخداد آتش‌سوزی می‌باشد، به‌طوری‌که یک شعله کوچک آتش می‌تواند زمینه‌ساز یک آتش‌سوزی مهیب به‌شمار رود. افزایش وقوع آتش‌سوزی‌های مکرر در جنگل‌های غرب ایران طی سال‌های اخیر، محیط‌زیست، جنگل‌ها، روستاها و ساکنان آن‌ها را در گستره‌های وسیع با خسارت و تلفات زیادی مواجه کرده است. ارزش اکولوژیکی جنگل‌های

بلوط در غرب ایران، صعب‌العبور بودن این مناطق، دقت در آمار آتش‌سوزی‌های گذشته و میزان خسارت به بار آمده از آن‌ها نشان از اهمیت این مسئله و ارائه راهکارهای لازم دارد (www.ilam.frw.org.ir). به همین دلیل در این پژوهش با استفاده از مدل شبیه‌سازی آتش (FARSITE) به شبیه‌سازی رفتار آتش در استان ایلام پرداخته شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

استان ایلام با ۱۹۰۸٦ کیلومترمربع حدود ۱/٤ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. این استان در غرب سلسله جبال زاگرس بین ´۵۸ °۳۱ تا ´۱۵ °۳٤ عرض شمالی و ´۲٤ °٤۵ تا ´۱۰ °٤۸ طول شرقی در گوشه غربی کشور قرارگرفته است (www.ilammet.ir). (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان ایلام

استان ایلام از جنوب با خوزستان، از شرق با لرستان، از شمال با کرمانشاه و از سمت غرب با ٤۲۵ کیلومتر مرز مشترک با کشور عراق همجوار است. این استان داری اقلیم سرد معتدل می‌باشد، که پس از سواحل شمالی، مناطق مرتفع شمال غربی و غرب، از مناطق پرباران کشور محسوب می‌شود و میانگین ٦۷٤/۲ میلی‌متر را دارا است. متوسط حداکثر دمای هوا در این استان بالاتر از ۲۰ درجه سلسیوس بوده است و در گرم‌ترین ماه سال به ۳۵/۷ درجه سلسیوس می‌رسد (www.ilammet.ir). براساس نقشه پوشش‌گیاهی، جنگل‌های استان ایلام حدود ٦٤۲ هزار هکتار از کل استان را در برمی‌گیرد که جزء جوامع جنگلی مناطق خشک و نیمه‌خشک سلسله جبال زاگرس هستند. تیپ غالب آن گونه بلوط ایرانی (*Quercus persica*) با ۹۰٪ ترکیب گونه‌ای است که شامل

۲۵۹٤ هکتار جنگل انبوه، ۲۱۱۰۸٤ هکتار جنگل نیمه‌انبوه، ٤١٦٧٩٥ هکتار جنگل تنک، ۷۲۰٦ هکتار بیشه‌زار و ۳۹۸۸ هکتار جنگل دست کاشت، می‌باشد (Jafarzadeh et al., 2017).

۳- مواد و روش‌ها

در جنگل‌های استان ایلام در طی سال ۱۳۹۵، ٤ مورد آتش‌سوزی توسط یگان حفاظت سازمان جنگل‌ها و مراتع استان ثبت گردیده است، که وسیع‌ترین آن در محدوده شهرستان شیروان و چرداول_ سرابله با ۱۰/۲ هکتار و کوچک‌ترین محدوده آتش‌سوزی مربوط به نواحی سیاه‌کوه جعفرآباد با وسعت ۳/۵ هکتار بوده است (www.ilam.frw.org.ir). با توجه به این اطلاعات و اینکه آتش‌سوزی یکی از مهم‌ترین عوامل مخرب جنگل‌ها محسوب شده و همواره این اکوسیستم‌ها را تهدید می‌کند (Marozas et al., 2012)، در این پژوهش سعی در پیش‌بینی و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌های ایلام با استفاده از مدل FARSITE شد.

شبیه‌سازی‌های مدل FARSITE نیازمند مجموعه‌ای از اطلاعات مکانی می‌باشد که در سه دسته از فاکتورهای اصلی محیطی تأثیرگذار بر رفتار آتش قرار می‌گیرند که عبارتند از: توپوگرافی، پوشش گیاهی و شرایط آب و هوایی (Hao, 2015)، که داده‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی (Williams et al., 2013)، به‌عنوان داده‌های سیمای سرزمین (Kanga et al., 2015) اطلاق می‌شوند. داده‌های هواشناسی نیز جزء داده‌های تکمیلی در شبیه‌ساز گسترش آتش می‌باشند (Morales et al., 2015).

۳-۱- توپوگرافی

این عامل توسط سه لایهٔ مختلف ارتفاع، شیب و جهت شیب تعریف می‌شود. لایه ارتفاع بدین منظور استفاده می‌شود تا به‌طور آدیاباتیکی، مقادیر دما و رطوبت را برای نقطه‌ای خاص محاسبه و تنظیم نماید. این لایه همچنین برای محاسبه سطح سوخته در فرایند شبیه‌سازی لازم می‌باشد. عامل شیب نیز با تغییراتی که در مقدار زاویه بین ماده سوختنی و شعله‌های آتش ایجاد می‌کند و همچنین جریانات هوایی ایجاد شده، در تسریع گسترش آتش نقش مهمی را دارا می‌باشد. جهت شیب نیز در محاسبه میزان رطوبت مواد سوختنی مرده می‌تواند نقش مهمی داشته باشد (Jahdi et al., 2015). در تحقیق حاضر از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور)، برای استخراج نقشه‌های ارتفاع، شیب و جهت استفاده شد. سپس برای آماده‌سازی لایه‌های توپوگرافی جهت ورود به مدل FARSITE، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS10 این لایه‌ها به فرمت ASCII (Singh and Kanga, 2017) تبدیل شدند.

۳-۲- پوشش گیاهی

پوشش گیاهی، بستر اشتعال‌پذیری است، که گسترش آتش را سبب گشته و به‌طور معنی‌داری خصوصیات و ویژگی‌های آتش را به خاطر تأثیراتش بر روی راحتی ایجاد نقطهٔ اشتعال، تعیین شدت آتش، نرخ گسترش و ارتفاع شعله، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Yin et al., 2018)، که نقشه‌های ماده سوختنی، میزان تاج پوشش و ارتفاع توده جنگل جزء اصلی این عامل می‌باشند (جهدی و همکاران: ۱۳۹٤).

۳-۲-۱- تاج پوشش و ارتفاع توده جنگل

لایه تاج پوشش منطقه به منظور محاسبه میزان رطوبت ماده سوختنی برای تمامی مدل‌های ماده سوختنی لازم و ضروری می‌باشد. این لایه همچنین در محاسبات مربوط به کاهش سرعت باد نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wu et al., 2013)، که نقشـهٔ تاج پوشش پس از دریافت از سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در محیط نرم‌افزار Arc GIS10 کلاس‌بندی شد و به فرمت قابل قبول برای مدل FARSITE تبدیل گشت. همچنین به منظور تولید لایه ارتفاع توده جنگل به خاطر نقشـی که این لایه می‌تواند در محاسبه نرخ کاهش سرعت باد در یک پروفیل عمودی از لایهٔ بالایی تاج جنگل تا سطح زیر اشکوب آن داشته باشد، از نقشه پراکنش گونه‌های درختی منطقه استفاده گردید (Hao, 2015).

۳-۲-۲- مادهٔ سوختنی

ازآنجایی‌که خصوصیات پوشش گیاهی منطقه نقش مؤثری در تعیین شرایط ماده سوختنی دارند (Nyatondo, 2015) و مدل مادهٔ سوختنی در شبیه‌ساز گسترش آتش‌سوزی نقش مهمی دارد، مدل مادهٔ سوختنی مناسب منطقه مورد تحقیق براسـاس توصیف ۵۳ مدل مادهٔ سوختنی استاندارد (Jahdi et al., 2015) که بر پایهٔ مدل گسترش آتش (Rothermel, 1972) توسعه یافته‌اند، انتخاب شد. این انتخاب با استفاده از نقشه‌های پوشش گیاهی، نقشه تراکم پوشـش منطقه و مشـاهدات و مطالعات میدانی و براساس شباهت مشخصات پوشش گیاهی موجود و توصـیف این مدل انجام گرفت. فرایند مدل‌سازی مادهٔ سوختنی شامل کلاسه‌بندی منطقهٔ تحقیق به نواحی با ویژگی‌های مادهٔ سوختنی منحصربه‌فرد و تعیین شاخص‌های مادهٔ سوختنی برای هرکلاسه است. در این تحقیق برای تهیهٔ نقشـهٔ مدل مادهٔ سـوختنی ابتدا از طریق کار میدانی منطقهٔ تحقیق براسـاس پوشـش گیاهی غالب، کلاسه‌بندی شد. سپس با توجه به کلاسه‌بندی اولیه، وسعت و توپوگرافی منطقه و پیمایش منطقه وضعیت تراکم جنگل، درصد پوشش تاج، عمق و فشردگی لاشبرگ جنگل، مقدار پوشش علفی کف جنگل برای تعیین بار ماده سـوختنی آماده برای اشـتعال در هر کلاسه برآورد و ثبت شد. حاصل این برداشت‌ها در محیط نرم‌افزار Arc GIS10 به نقشه‌های موضوعی مربوط تبدیل شد.

۳-۳- آب و هوا

این عامل توسـط درجهٔ حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و جهت باد تعریف می‌شود و نقش مهمی در گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها دارد. برای تهیهٔ داده‌های هواشناسی اطلاعات هواشناسی از نزدیک‌ترین ایستگاه سـینوپتیک به منطقه با فاصـله زمانی ۳ سـاعته دریافت شـد. از میان فاکتورهای هواشـناسـی مؤثر در رفتار آتش‌سـوزی، باد دارای بیشـترین تغییرپذیری و همچنین اهمیّت می‌باشـد. باد به دو طریق می‌تواند در انتقال حرارت و گسترش آتش‌سوزی نقش ایفا نماید. اولاً، باد می‌تواند سرعت آتش را در نتیجه افزایش اکسیژن زیاد نماید. ثانیاً، باد به واسطه خم کردن شعله‌ها و در نتیجه کاهش فاصله و زاویه بین منبع حرارت و مواد سوختنی موجود در مسیر، حرکت آتش را تسریع می‌کند. تأثیر باد در کنار عامل شیب، می‌تواند سرعت گسترش را دو چندان نماید (Sanjuan et al., 2014). با توجه به اهمیت این عامل در این پژوهش از مدل WindNinja، برای شبیه‌سازی باد استفاده گردید. این مدل قادر است با استفاده از داده‌های نقطه‌ای و ثابت باد، مجموعه‌ای از مقادیر پیوسته و یکپارچه از سرعت و جهت باد را با توجه به توپوگرافی منطقه تهیه کند (Pinto et al., 2016).

۳-٤- شبیه‌سازی رفتار آتش جنگل و ارزیابی آن

به منظور انجام شبیه‌سازی لایه‌های GIS (شیب، جهت، ارتفاع، ماده سوختنی و تاج پوشش) با فرمت مناسب وارد مدل FARSITE شدند، خروجی حاصل از مدل به عنوان لایهٔ سیمای سرزمین تهیه گردید که خصوصیات مکانی مورد نظر برای شبیه‌سازی را دارد. سپس با وارد کردن داده‌های هواشناسی و خروجی مدل WindNinja اطلاعات ورودی به مدل کامل گردید و شبیه‌سازی آتش با استفاده از مدل FARSITE در اکوسیستم جنگل ایلام به پایان رسـید. درنهایت به منظور ارزیابی دقت شـبیه‌سازی، از شاخص کاپا استفاده شد (Jahdi et al., 2014) (رابطهٔ ۱).

رابطه(۱)

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{ii} - \sum_{i=1}^{n} q_{ii}}{1 - \sum_{i=1}^{n} q_{ii}}$$

که در آن p_{ii} احتمال مشاهده شده و q_{ii} احتمال مورد انتظار می‌باشد که مطابق روابط (۲و ۳) محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

$$p_{ii} = \frac{T_{1.} * T_{.1}}{T_{..}} \qquad p_{ii} = \frac{T_{1.} * T_{.1}}{T_{..}}$$

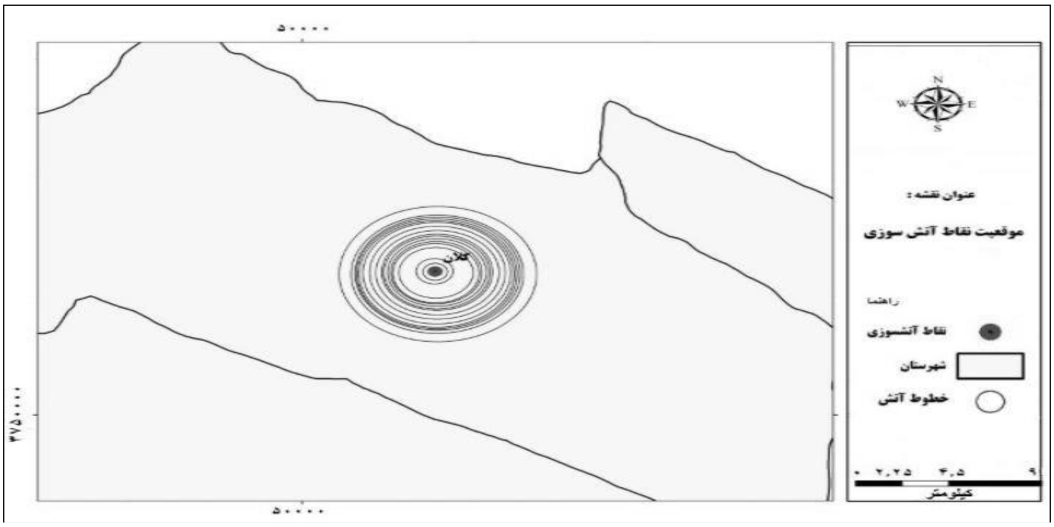
رابطه (۳)

$$q_{ii} = \frac{T_{0.} * T_{.0}}{T_{..}} \qquad q_{ii} = \frac{T_{0.} * T_{.0}}{T_{..}}$$

سپس بعد از تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای تأثیرگذار و شبیه‌سازی آتش‌سوزی رخ داده در منطقه با استفاده از مدل FARSITE، این تحقیق بر آن شد تا با استفاده از مدل فوق‌الذکر، به پهنه‌بندی منطقه از نظر میزان وسعت آتش‌سوزی بپردازد. برای این کار از تعدادی نقاط اشتعال که به‌طور منظم و با فواصل ۱۰۰۰ متر در منطقه پراکنده شده بود استفاده گردید و از مساحت آتش‌سوزی رخ داده برای هر نقطه، به‌عنوان معیاری برای تعیین میزان ریسک‌پذیری منطقه از نظر وسعت آتش‌سوزی در نتیجه شروع حریق استفاده گردد.

٤- نتایج و بحث

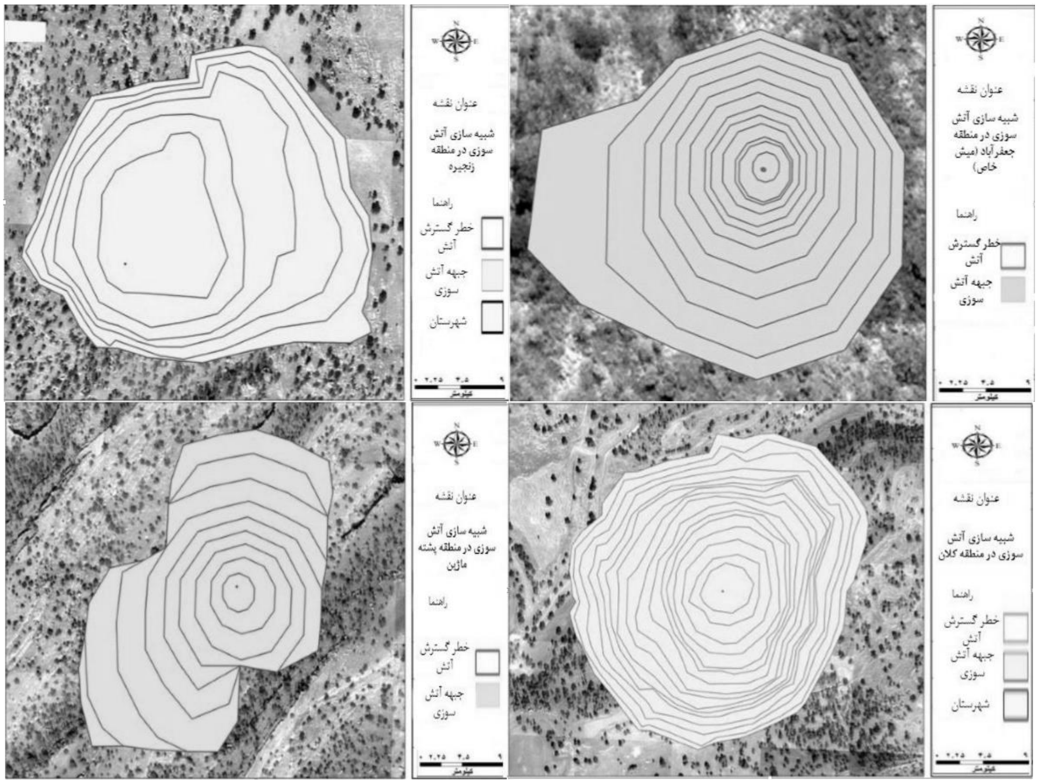
زمان، مکان و چگونگی وقوع آتش‌سوزی جنگل نامشخص است. البته تحقیقات زیادی برای تهیهٔ نقشه حساسیت خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها به‌عنوان یکی از اطلاعات لازم برای مدیریت این مناطق انجام گرفته است (Ghobadi et al., 2012). هنگام آتش‌سوزی پیش‌بینی جهت گسترش و رفتار آتش جنگل به منظور کنترل و مدیریت آن مهم است. آگاهی از چگونگی گسترش آتش در زمان، لازمه مدیریت عملیات کنترل و اطفای حریق است (Arca, 2006). در تحقیق حاضر، قابلیت شبیه‌ساز FARSITE در جنگل‌های استان ایلام مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا به منظور مطالعه رفتار آتش‌سوزی ابتدا شبیه‌سازی برای شرایط یکسان (توپوگرافی هموار، دما و رطوبت نسبی یکسان و میانگین تابستان ۱۳۹۵، فاقد جریان باد، ماده سوختنی یکنواخت) منطقه صورت پذیرفت. این شبیه‌سازی به منظور بررسی مقدماتی از نحوه عملکرد مدل و تأثیرپذیری از شرایط محیطی که می‌تواند نقش مهمی در نحوه عملکرد و رفتار آتش داشته باشد، صورت پذیرفت (شکل ۲). همان‌گونه که Richard (۱۹۹۰) بیان داشت، گسترش آتش در عرصه‌های طبیعی که دارای ماده سوختنی یکسان و از نظر شیب و باد نیز ثابت می‌باشند، به صورت بیضی‌های منظم هستند. با این مبنا، مدل FARSITE از مجموعه‌ای از بیضی‌های یکسان برای نمایش جبهه آتش در شرایط یکسان محیطی استفاده می‌کند، که مجموعه رأس این بیضی‌ها تشکیل دوایر متحدالمرکز را می‌دهد. این منحنی‌های گسترش در برخی از قسمت‌ها دارای فواصل کم و در جاهایی از شکل نیز دارای فاصله نسبتاً بیشتری از هم می‌باشند. در بخش‌هایی که این فواصل کم و منحنی‌های گسترش به هم نزدیک‌تر می‌باشند، نشان‌دهنده گسترش آتش‌سوزی در طی شب می‌باشد که در واقع کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی، باعث کاهش سرعت گسترش می‌شود. در مقابل، در طی روز که دما افزایش و رطوبت نسبی کاهش می‌یابد، سرعت گسترش بیشتر شده و در نتیجه فواصل مابین منحنی‌های جبهه پیش‌روی آتش نیز بیشتر می‌شود. نتایج پژوهش متکان و همکاران (۱۳۹۲) مبنی بر پیش‌بنی شرایط گسترش آتش‌سوزی در شرایط یکسان همراستا با نتایج این پژوهش می‌باشد.



شکل ۲- شبیه‌سازی در شرایط یکسان محیطی

ســـپس بـه منظور ارزیابی مدل FARSITE در شــبیه‌ســازی آتش‌ســوزی‌های جنگل‌های اســتان ایلام از آتش‌سـوزی‌هایی که در چهار منطقهٔ رنجیره، کلان، پشـته ماژین و جعفرآباد (میش خاص) در سـال ۱۳۹۵ به وقوع پیوسـت اسـتفاده شـد. برای دستیابی به نقشه‌های شبیه‌سازی دقیق‌تر از داده‌های هواشناسی ۷ روز پی‌درپی مربوط به روزهایی که آتش‌ســوزی در منطقه به وقوع پیوســت، آورده شــد. همچنین ســرعت و جهت باد با توجه به توپوگرافی منطقه، برای هر سـه سـاعت، به وسیله برنامه WindNinja شبیه‌سازی شد تا به جای استفاده از داده‌های نقطه‌ای و ثابت باد، مجموعه‌ای از مقادیر پیوسـته و یکپارچه سـرعت و جهت باد برای فرایند شـبیه‌سـازی استفاده گردد (شـکل ۳). نتایج نشان می‌دهد در چهار منطقه که آتش‌سوزی رخ داده آتش رفتار مختلفی داشته است. شیب به‌عنوان یک عامل مهم بر روی شـدت و جهت گسترش آتش‌سوزی تأثیر دارد. آتش به سمت شیب‌های بالا حرکت می‌کند (Zarekar et al., 2012). ارتفاع نیز بر روی رطوبت، باد، ساختار گیاهی، رطوبت ماده سوختنی تأثیر می‌گذارد (Adab et al., 2012). نکته حائز اهمیت در مورد گسترش جبهه آتش‌سوزی در منطقه کلان وجود محدودیت ارتفاعی (ارتفاع کم) و شیب (شیب ملایم) در منطقه می‌باشد که مانع از پیش‌روی بیشتر در منطقه شـده اسـت. در منطقه کلان گسترش آتش‌سوزی از سمت غرب منطقه به سمت شرق بوده که با کاهش ماده سـوختی و افزایش بافت سـنگی از شـدت آن کاسـته است. این نتایج در منطقهٔ کلان با مطالعات Morales و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر تأثیر ماده سوختنی با گسترش آتش‌سوزی مطابقت دارد. در منطقه زنجیره در منطقهٔ رنجیره گسترش آتش‌سوزی از سمت غرب منطقه به سمت شرق بوده که با کاهش ماده سوختی و افزایش بافت سنگی از شدت آن کاسته است.

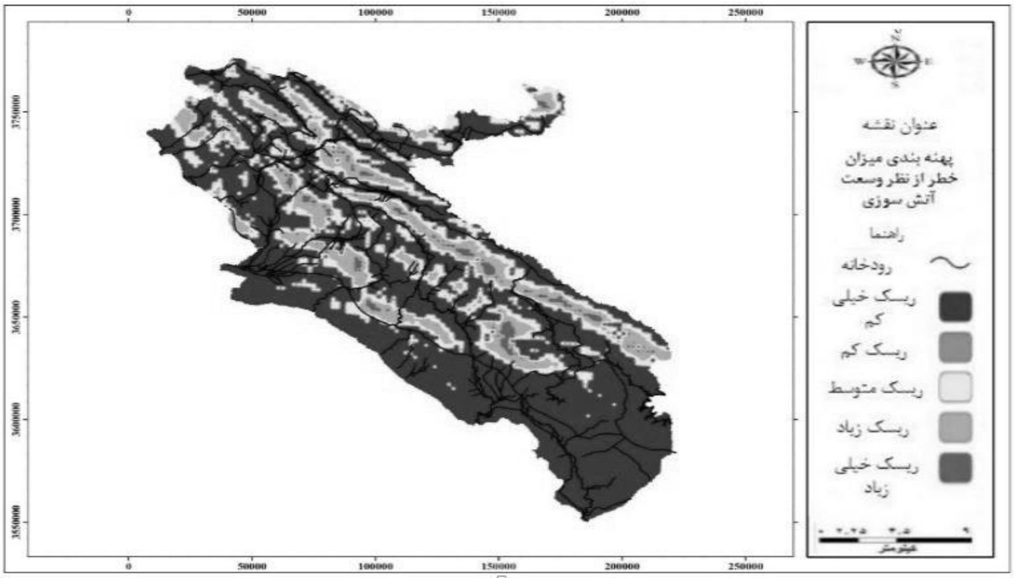
به دلیل شرایط مطلوب ماده سوختی در منطقه جعفرآباد (میش خاص) گسترش آتش‌سوزی تقریباً هموار و در تمام جهات بوده است، زیرا در این منطقه تیپ غالب، تیپ جنگلی می‌باشد، که تیپ ماده سوختنی جنگل طبیعی دارای بیش‌ترین آتش به دلیل بار ماده سوختنی سنگین است (جهدی و همکاران، ١٣٩٤) و تنها عامل باد و توپوگرافی عامل محدود کننده می‌باشـــد که نتایج حاصـــله با نتایج تحقیقات Zheng و همکاران (٢٠١٧)، Duane و همکاران (٢٠١٦)، Herrera (٢٠١٦) و Guoو همکاران (٢٠١٧) مبنی بر تأثیر اقلیم و توپوگرافی بر گسترش آتش‌سوزی همسو می‌باشد. نهایت در منطقه پشته ماژین با توجه به شکل و نیز گسترش آتش‌سوزی در منطقه، آتش به صورت طولی و در امتداد دره گسترش یافته که پیش‌بینی می‌شود به دلیل وجود ماده سوختی و نیز جریان باد بوده است که Moon و همکاران (٢٠١٦) نیز در پژوهش خود عامل گسترش آتش را سرعت باد و نوع مادهٔ سوختنی بیان کردند.



شکل ٣- شبیه‌سازی آتش‌سوزی الف) جعفرآباد (میش خاص) ب) زنجیره ، ج) کلان د) پشته ماژین

سپس با توجه به میزان گسترش آتش و با توجه به نقش دما و مواد سوختنی نقشهٔ پهنه‌بندی خطر گسترش آتش ایجاد گردید، با توجه به نقشهٔ مورد نظر پهنهٔ خیلی کم بیش‌ترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

این مناطق با توجه به نقشهٔ پوشش گیاهی فاقد پوشش گیاهی می‌باشند و بیشتر در قسمت‌های جنوب‌شرقی قرار دارند. در ردهٔ دوم و سوم نیز پهنهٔ متوسط با ۱۳/۸ درصد و پهنهٔ زیاد ۱۱/٤ درصد قرار دارند. در این مناطق وجود جنگل با تراکم متوسط و بالا یکی از عوامل گسترش آتش است، که Kanga و Singh (۲۰۱۷) در تحقیقات خود به نوع و تراکم جنگل و تأثیر مستقیم این عوامل بر گسترش آتش تاکید دارند. در این مناطق عوامل توپوگرافی مستعد برای گسترش آتش به‌چشم می‌خورد، مجموع این عوامل سبب ایجاد پهنه‌بندی با خطر ریسک بالا شده است.



شکل ۵- پهنه‌بندی از نظر خطر گسترش آتش

جدول ۲- درصد و مساحت تحت پوشش پهنه‌های مختلف

ردیف	میزان ریسک‌پذیری	مساحت (هکتار)	درصد
۱	خیلی کم	۱۲۷۰۰۰۰	٣٦/٤
۲	کم	۱۹۸۰۵۰	۹/۹
۳	متوسط	۲۷۷۹۰۰	۱۳/۸
٤	زیاد	۲۲۹۹۵۰	۱۱/٤
۵	خیلی زیاد	۳۰٦۵۰	۱/۵

همچنین می‌توان بیان داشت که پهنه‌بندی ایجاد شده در این پژوهش، نقطه مقابل پهنه‌بندی خطر شروع آتش‌سوزی می‌باشد؛ زیرا در پهنه‌بندی از نوع شروع آتش‌سوزی، پهنه‌های پرخطر در مجاورت مراکز

سکونتگاهی و جمعیتی، جاده‌ها و راه‌های ارتباطی و همچنین مراکز تفریگاهی می‌باشد، درصورتی که پهنه‌های پرخطر در این تحقیق مربوط به نواحی بوده که دسترسی به آنجا نسبتاً دشوارتر می‌باشد. همچنین ۱/۵ درصد از منطقه دارای ریسک بسیار زیاد به منظور آتش‌سوزی برآورد شد که نواحی با ریسک بالا از نظر وقوع آتش‌سوزی، میزان بالای اولویت را برای اقدامات پیشگیرانه و اجرای اقدامات حفاظتی دارند. تهیه نقشه ریسک با صحت بالا می‌تواند نقش مهمی در بررسی و ارزیابی میزان حساسیت عرصه‌های جنگل و اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح اطفای حریق در جنگل‌های استان ایلام دارد و طبیعتاً در صورت عدم چاره‌اندیشی صحیح، این مقدار پوشش سبز موجود و باقیمانده نیز از بین خواهد رفت؛ بنابراین نقشه حاصل از این تحقیق می‌تواند در مدیریت آتش‌سوزی جنگل، پیش‌گیری به همراه جلوگیری از وقوع آتش‌سوزی و در نهایت اطفاء سریع آن به همراه شناسایی سریع مناطق آتش‌سوزی در آینده و نصب برج‌های دیده‌بانی آتش در نواحی با ریسک بالا کمک کند. براساس نقشه تهیه شده، بخش‌های اجرایی می‌توانند اقدامات لازم را برای پیش‌گیری یا مقابله با آتش‌سوزی و برنامه‌ریزی تأمین امکانات مورد نیاز انجام دهند.

سپس به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی، از شاخص کاپا استفاده شد. اگر مقدار کاپا صفر باشد نشان‌گر یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی است و اگر مقدار شاخص کاپا یک باشد نشان‌دهنده یک طبقه‌بندی کاملاً صحیح است و مقدار منفی نیز به معنی وجود خطا در طبقه‌بندی می‌باشد، با توجه به نتایج حاصل ضریب کاپای اندازه‌گیری شده برای مقادیر شبیه‌سازی شده، شبیه‌سازی منطقه کلان بهترین نتیجه را داشته است (جدول ۱).

جدول ۳- ضریب کاپای اندازه‌گیری شده برای مقادیر شبیه‌سازی

نقاط آتش‌سوزی	ضریب کاپا
پشته ماژین	۰/۴۳
زنجیره	۰/۳۳
میش خاص	۰/۳۸
کلان	۰/۴۸

۵- نتیجه‌گیری

می‌توان بیان داشت که بررسی عوامل مختلف (توپوگرافی، پوشش‌گیاهی، ماده سوختنی و شرایط اقلیمی) در مناطق مورد بررسی نشان‌دهندهٔ پیچیدگی بالای رفتار آتش در عرصه‌های طبیعی این مناطق می‌باشد؛ که تحت کنترل عوامل مختلفی قرار دارد برای شناسایی رفتار آتش، بایستی تمامی پارامترها و عوامل تاثیرگذار به‌صورت یک‌جا و در ارتباط باهم مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی FARSITE و ارزیابی صحت آن در منطقه با استفاده از ضریب کاپا مشخص گردید تمامی نقاط دارای توافق با مقادیر واقعی

هستند، که نشان از کارایی مدل در این منطقه است. پس استفاده اجرایی از این مدل راهنمای مفیدی برای مدیریت آتش‌سوزی جنگل می‌باشد و براساس آن می‌توان برنامه مدیریت بحران آتش‌سوزی در سه فاز عملیات مقدماتی یا اقدامات قبل وقوع (طرح پیش‌گیری)، اقدامات حین وقوع (طرح مقابله) و عملیات پس از وقوع (طرح بازیابی) تدوین شود.

کتابنامه

اسکندری، س؛ ۱۳۹٤. تحلیلی بر روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در جنگل‌ها. انسان و محیط‌زیست. ۳٤: صص ٦۷–۸۸.

جهدی، ر.، درویش‌صفت، ع.ا.، اعتماد، و؛ ۱۳۹٤. تهیه نقشه ماده سوختنی و پیش‌بینی رفتار آتش سطحی با استفاده از FARSITE. چوب و جنگل. ۲۲ (۲): صص ۲۰۷–۲۲۵.

قائمی‌راد، ط.، کریمی، م؛ ۱۳۹٤. ارزیابی عملکرد مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی جنگل با استفاده از اوتوماتای سلولی (پژوهش موردی: جنگل‌های بخش لاکان شهرستان رشت). جنگل و صنوبر ایران. ۲۳ (۱): صص ٦٤–۷۸.

متکان، ع.ا.، شکیبا، ع.ر.، میرباقری، ب.، بازاری‌جامخانه، م؛ ۱۳۹۲. شبیه‌سازی گسترش آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی با استفاده از FARSITE (مطالعه موردی: جنگل‌های شهرستان نکا). همایش ملی پژوهش‌های محیط‌زیست ایران. همدان- دانشگاه شهید مفتح، NCER01_128.

Adab, H., Devi Kanniah, K., & Solaimani, K., 2012. Modeling forest fire risk in the northeast of Iran using remote sensing and GIS techniques, *Natural Hazard* 65(3), 1723-1743.

Ager, A.A., Preisler, H., Arca, B., Spano, D., & Salis, M., 2014. Wildfire risk estimation in the Mediterranean area, *Environmetrics* 25: 384–396.

Arca, B., Duce, P., Pellizzaro, G., Laconi, M., Salis, M., &Spano, D., 2006. Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean shrub land, *Forest Ecology and Management* 234, 110-110.

Artes, T., Cencerrado, A., Cortes, A., & Margalef, T., 2013. Relieving the effects of uncertainty in forest fire spread prediction by hybrid MPI-OpenMP parallel strategies. International Conference on Computational science, *Procedia Computer Science* 18, 2278-2287.

Brun, C., Artes, T., Cencrrrado, A., Margalef, T., & Cortes, A., 2017. A High Performance Computing Framework for Continental-Scale Forest Fire Spread Prediction, *Procedia Computer Science* 108, 1712-1721.

Coban, H.O., &Mehmet, E., 2010. Analysis of Forest Road Network Conditions Before and After Forest Fire, FORMEC 2010, Forest Engineering: *Meeting the Needs of the Society and the Environment* 125, 11-14.

Denham, M., Wendt, K., Bianchini, G., Cortés, A., &Margalef, T., 2012. Dynamic Data-Driven Genetic Algorithm for forest fire spread prediction, *Journal of Computational Science* 3 398-404.

Duane, A., Aquilué, N., Gil-Tena, A., & Brotons, L., 2016. Integrating fire spread patterns in fire modelling at landscape scale, *Environmental Modelling & Software* 86, 219-231.

Finney, M.A., 2004. FARSITE: Fire Area Simulator Model Development and Evaluation, nited States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain, 52.

Ghobadi, G.J., Gholizadeh, B., &Dashliburun, O.M., 2012. Forest fire risk zone mapping from geographic information system in Northern Forests of Iran (Case study, Golestan Province), *International Journal of Agricultural Crop Science* 4(12), 818-824.

Guo, F., Su, Z., Wang, G., Sun, L., Tigabu, M., Yang, X., &Hu, H., 2017. Understanding fire drivers and relative impacts in different Chinese forest ecosystems, *Science of The Total Environment* 605, 411-425.

Hao, Y., 2018. California Wildfire Spread Prediction using FARSITE and the Comparison with the Actual Wildfire Maps using Statistical Methods, UCLA, 12 (5), 1-20.

Herrera, G.V., 2016. Mexican forest fires and their decadal variations, *Advances in Space Research* 58 (10), 2104–2115.

Jafarzadeh, A. A,, Mahdavi, A., &Jafarzadeh, H., 2017. Evaluation of forest fire risk using the Apriori algorithm and fuzzy c-means clustering, *JOURNAL OF FOREST SCIENCE* 63 (8), 370–380.

Jahdi, R., Darvishsefat, A.A., Etemad, V.,&Mostafavi, M.A., 2014. Wind Effect on Wildfire and Simulation of its Spread (Case Study: Siahkal Forest in Northern Iran), *Journal of Agricultural Science and Technology* 16, 1109-1121.

Jahdi, R., Salis, M., Darvishsefat, A. A., Mostafavi, M. A., Alcasena, F., Etemad, V., Lozano, O., &Spano, D., 2015. Calibration of FARSITE simulator in northern Iranian forests, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* 15, 443–459.

Kanga, S., &Singh, S. K., 2017. Forest Fire Simulation Modeling using Remote Sensing & GIS, *International Journal of Advanced Research in Computer Science* 8 (5) 326-332.

Kanga, S., Sharma, L.K., &Nathawat, M.S., 2015. Himalayan Forest Fires Risk Management: A Geospatial Approach, *Lambert Academic Publishing* 67, 1-188.

Liu, Y., Goodrick, S. L., &Stanturf, J. A., 2013. Future U.S. wild fire potential trends projected using a dynamically downscaled climate change scenario, *Forest Ecology and Management* 294, 120 – 135.

Marozas, V., Racinskas, J., & Bartkevicius, E., 2007. Dynamics of ground vegetation after surface fires in hemi boreal Pinus sylvestris forests, *Forest Ecology and Management* 250(1-2), 47–55.

Moon, K., DuffaK, T.J., & Tolhurst, G., 2016. Sub-canopy forest winds: understanding wind profiles for fire behaviour simulation, *Fire Safety Journal* 24,311-320.

Morales, J., Mermoz, M., Gowda, J., & Kitzberger, T., 2015. A stochastic fire spread model for north Patagonia based on fire occurrence maps, *Ecological Modelling* 300, 73-80.

Nuryanto, D.E., 2015. Simulation of Forest Fires Smoke Using WRF Chem Model with FINN Fire Emissions in Sumatera, *Procedia Environmental Sciences* 24, 65 – 69.

Nyatondo, U.P., 2010. Fire Spread Modeling in Majella National Park, Italy. MSc thesis, Twente University, 205.

Pinto, R., Benali, A., Sá, A., Fernandes, P., Soares, P., Cardoso, R., Trigo, R., & Pereira, J., 2016. Probabilistic fire spread forecast as a management tool in an operational setting, *Springerplus* 5 (1), 1205-1212.

Rothermel, R.C., 1972. A Mathematical Model for Prediction Fire Spread in Wild land Fuels,USDA Forest Service,48.

Rwanga, S.S., &Ndambuki, J.M., 2014. Application of geographical information systems and FARSITE in fire spread modeling, I*nternational Journal of Environment and Sustainable Development* 13 (2), 1105-1120.

Salis, M., Ager, A.A., Alcasena, F., Arca, B., Finney., M. A, Pellizzaro, G., &Spano, D., 2015. Analyzing seasonal patterns of wildfire likelihood and intensity in Sardinia, Italy. *Environ. Monitoring Assess* 187, 1–20.

Sanjuan, G., Brun, C., Margalef, T.,& Cortes, A., 2014. Wind field uncertainty in forest fire propagation prediction, *Procedia Computer Science* 29, 1535–1545.

Shen, C., Prince, D., Gallacher, J., Fletcher, M,. &Fletcher, T., 2017. Semi-empirical Model for Fire Spread in Chamise and Big Sagebrush Shrubs with Spatially-Defined Fuel Elements and Flames, National Combustion Meeting Organized by the Eastern States Section of the Combustion Institute 124, 1-6.

Williams, B.J., Song, B., &Williams T.M., 2013. Visualizing mega-fires of the past: A case study of the 1894 Hinckley Fire, east-central Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management* 294, 107-119.

Wu, Z., He, H.S., Liu, Z., &Liang, Y., 2013. Comparing fuel reduction treatments for reducing wildfire size and intensity in a boreal forest landscape of northeastern China, *Science of the Total Environment* 454, 30–39.

www.ilam.frw.org.ir

www.ilammet.ir

Yin, H., Jin, H., Zhao, Y., Fan, Y., Qin, L., Chen, O., Huang, L., Jia, X., Liu, L., Dai, Y., &Xiao, Y., 2018. The simulation of surface fire spread based on Rothermel model in wind throw area of Changbai Mountain (Jilin, China), *AIP Conference Proceedings* 19 (1), 124-135.

Zarekar, A., Vahidi, H., Kazemi Zamani, H., Ghorbani, S.,& Jafari, H., 2012. Forest fire hazard mapping using fuzzy AHP and GIS, Study area: Gilan province of Iran, *International journal on Technical and physical problems of engineering* 12(3), 47-55.

Zheng, Z., Huang, W., Li, S., &Zeng, Y., 2017. Forest fire spread simulating model using cellular automaton with extreme learning machine, *Ecological Modeling* 348, 33–43.